УДК 621.313.333.536.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МНОГОФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Д.М. Глухов, О.О. Муравлёва

Томский политехнический университет
E-mail: Glukhov_DM@tpu.ru

Предложена математическая модель тепловых процессов в многофазном асинхронном двигателе, которая позволяет рассчитать превышение температуры обмотки при аварийных режимах. Адекватность модели проверена экспериментально.

Введение

Интенсивное развитие электроники и микропроцессорной техники приводит к созданию качественных регулируемых электроприводов переменного тока для замены электроприводов постоянного тока и нерегулируемого электропривода переменного тока благодаря большей надёжности электродвигателей переменного тока по сравнению с машинами постоянного тока [1].

Регулируемые электроприводы завоевывают области применения нерегулируемых как для обеспечения технологических характеристик, так и с целью энергосбережения. Причем предпочтение отдается именно машинам переменного тока, асинхронным (АД) и синхронным (СД), так как они имеют лучшие массогабаритные показатели, более высокую надежность и срок службы, проще в обслуживании и ремонте по сравнению с коллекторными машинами постоянного тока. Даже в такой традиционно «коллекторной» области, как электрический транспорт, машины постоянного тока уступают место частотно-регулируемым двигателям переменного тока [2]. Все большее место в продукции электромашиностроительных заводов занимают модификации и специализированные исполнения электродвигателей.

Создать универсальный, подходящий для всех случаев жизни частотно-регулируемый двигатель нельзя. Оптимальным он может быть только для каждого конкретного сочетания закона и способа управления, диапазона регулирования частоты и характера нагрузки. Многофазный асинхронный двигатель (МАД) может являться альтернативой трёхфазным машинам при питании от преобразователя частоты.

Целью настоящей работы является разработка математической модели для исследования тепловых полей многофазных асинхронных двигателей как в установившихся, так и в аварийных режимах работы, которые сопровождаются отключением (обрывом) фаз (или одной фазы) для того, чтобы показать возможность работы асинхронных машин в составе регулируемого электропривода без применения дополнительных средств охлаждения.

Моделирование теплового поля

Особенности эксплуатации электрических машин в регулируемом электроприводе, а также высокие вибрации и шум, накладывая определённые требования к конструкции, требуют иные подходы при проектировании. Вместе с тем, особенности многофазных двигателей делают такие машины пригодными для применения в регулируемых при-

водах различного назначения, а в случае повышенных требований к надёжности и динамическим свойствам практически единственно возможными машинами в связи с простотой их производства, так как многофазная машина может быть выполнена на базе трёхфазного асинхронного двигателя. Многофазные машины находят на практике всё возрастающее применение в широком диапазоне мощностей от ед. кВт и ниже до ед. МВт.

Одна из главных задач современной электромеханики – создание методов исследования как электромеханических систем, объединяющих различные электромеханические преобразователи, электрические и механические элементы, так и способов воспроизведения магнитных полей и изучения процессов в самих электромеханических преобразователях. Это можно сделать на основе математического моделирования, которое воспроизводит характеристики некоторого объекта – оригинала – на другом объекте – модели, подобный оригиналу и созданный специально для изучения его свойств.

Используемый нами пакет ELCUT 4.2T предоставляет возможность проводить моделирование теплового поля электрической машины методом конечных элементов. Поле является двухмерным. Универсальность пакета позволяет вводить геометрические параметры, источники тепла, граничные условия и получать результат в любой точке сечения статора. Возможность расчёта нестационарных тепловых процессов позволяет получать результат в виде графика изменения температуры во времени или в виде таблицы.

Наиболее интересным представляется расчёт и моделирование нестационарных тепловых процессов при работе многофазных машин в режиме обрыва фазы (или фаз), т.к. в этом случае происходит скачок тока в оставшихся обмотках, и запаса теплоёмкости и охлаждения может не хватить для нормального функционирования машины. Поэтому полезно знать возможности машины по продолжительности эксплуатации двигателя в заданном режиме.

Исследование переходных тепловых процессов для ответственных электроприводов повышенной надёжности обусловлено тем, что для таких электроприводов может быть невозможным немедленное отключение при возникновении аварийного режима (обрыва фазы), а необходимо продолжить эксплуатацию машины некоторое время для обеспечения отключения без серьёзных последствий. Таким образом, необходимо выяснить продолжительность эксплуатации машины при обрыве фазы (или фаз) по условиям безопасного нагрева статорной обмотки. Очевидно также, что обрыв одной фазы позволит эксплуатировать машину более продолжительное время, нежели обрыв двух фаз, так как при равной теплоёмкости частей двигателя увеличение тепловыделения (рост токов в оставшихся фазах) приведёт к более быстрому нарастанию температуры и достижению предельной температуры, при которой необходима остановка электропривода для устранения неполадок.

Уравнение теплопроводности для двухмерного теплового поля представляется в виде [4]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t};$$

где T – температура; t – время; $\lambda x(y,z)$ – компоненты тензора теплопроводности (в линейной постановке); $q(T)$ – удельная мощность тепловыделения; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала.

Математическая модель

Для того, чтобы произвести расчёт токов в обмотках фаз, необходимо сделать электромагнитный расчёт двигателя для определения параметров машины, таких как активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора и скольжения, соответствующего номинальной мощности. Затем была составлена расчётная программа в среде MathCAD 2001 для определения токов и моментов.

В основу предложенной математической модели вращающего момента многофазного асинхронного двигателя, работающего при обрыве фазы входят следующие положения. Во-первых, конструкция обмотки МАД легко преобразуется из трёхфазной в многофазную. Во-вторых, из исследований вопроса выяснилось, что наиболее оптимальным является симметричное исполнение МАД с нечётным и чётно-нечётным числом фаз и при расщеплении его многофазной обмотки на трёхфазные группы. Поэтому, можно считать, что многофазная машина это такая, которая в электрическом отношении состоит из нескольких трёхфазных, размещённых на одном сердечнике статора. Поэтому система управления разбивается на трёхфазные группы и, например, девятифазной машиной управляют три трёхфазных преобразователя, согласованных по работе во времени. Таким образом, мощность двигателя, получаемая электромагнитным преобразованием, можно условно разделить на число трёхфазных групп и считать, что все они в равной степени участвуют в работе машины. Обрыв фаз представляет собой отключение какой-либо фазы в тройке и функционировании этой группы фаз в однофазном режиме. При этом, обратная составляющая магнитного поля этой однофазной системы будет воздействовать на оставшиеся полноценные трёхфазные группы, что можно учесть.

Для реализации поставленной цели необходимо произвести расчёт токов в обмотках МАД, расчёт токов в аварийном режиме при обрыве фазы (или фаз), произвести тепловое моделирование нестационарного нагрева двигателя в условиях равномерной и неравномерной тепловой загрузки МАД. После анализа полученных результатов можно произвести построение графиков, диаграмм и т.п., для наглядного пояснения результатов.

Для того чтобы произвести расчёт токов в обмотках фаз, необходимо сделать электромагнит-

ный расчёт двигателя для определения параметров машины с заданными номинальными данными.

Исходные данные: $P_{2н}$ – номинальная мощность двигателя, кВт; $2p$ – число полюсов; $U_{1н}$ – номинальное фазное напряжение, В, m – число фаз двигателя; $n_н$ – синхронная частота вращения, об/мин.

Параметры, получаемые в результате электромагнитного расчёта: r_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом; r_2^1 – приведённое активное сопротивление обмотки ротора, Ом; x_1 – индуктивное сопротивление обмотки статора, Ом; x_2^1 – приведённое сопротивление обмотки ротора, Ом; s – скольжение.

Обрыв какой-либо фазы многофазной машины приводит к искажению магнитного поля в связи с тем, что обрыв фазы в трёхфазной группе ведёт к возникновению пульсирующего магнитного поля от этой уже двухфазной системы. По методике, предложенной в [3] можно рассчитать электромагнитный момент, создаваемый от этого пульсирующего магнитного поля разложением на симметричные составляющие ток в обмотках, т.к. трёхфазные группы многофазной машины представляют собой аналогичную конструкцию трёхфазной машины. Для этого используем уравнения фазных токов, собственные и взаимные сопротивления отдельных фаз, Ом:

$$\begin{cases} Z_\sigma = \dfrac{Z_+ + Z_-}{3}; Z_\alpha = \dfrac{ej_+Z_+ + ej_-Z_-}{3}; \\ Z_\beta = \dfrac{ej_+Z_- + ej_-Z_+}{3}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} Z_+ = \dfrac{1}{\dfrac{1}{Z_{2s+}} + \dfrac{1}{jx_m}}; Z_- = \dfrac{1}{\dfrac{1}{Z_{2s-}} + \dfrac{1}{jx_m}}; \\ Z_{2s+} = \dfrac{r_2^1}{s} + jx_2^1; Z_{2s-} = \dfrac{r_2^1}{2-s} + jx_2^1. \end{cases}$$

Математическая модель вращающего момента многофазного асинхронного двигателя, работающего при обрыве фазы:

$$M = \frac{m_1 p}{2\pi f}(I_+^2 r_+ - I_-^2 r_-), \quad \text{Н} \cdot \text{м},$$

где r_+=ReZ_+, Ом; r_-=ReZ_-, Ом.

Для определения токов прямой и обратной последовательностей необходимо получить выражения для собственных и взаимных полных сопротивлений фаз, Ом, обусловленных потоком в зазоре:

$$Z_{AA} = Z_\sigma; \quad Z_{BB} = Z_\sigma; \quad Z_{AB} = Z_\alpha.$$

Теперь можно представить систему последовательно включённых обмоток на напряжение U, заменив падения напряжений на сопротивления фаз, обусловленных полем в зазоре, ЭДС E_A, E_B, E_C, включёнными встречно приложенному напряжению, а индуктивные сопротивления рассеяния и активные сопротивления обмоток статора (в общем случае тоже несимметричные) объединить с внешними сопротивлениями, включёнными в фазы А, В и С, обозначив их Z_{1AA}, Z_{1BB}, Z_{1CC}. Решив уравнения Кирхгофа, получим:

$$I_A = -I_B = \frac{U_1}{Z_{1AA} + Z_{1BB} + Z_{BB} - Z_{AB} - Z_{BA}}, \text{ А}.$$

Прежде всего рассчитывается момент двигателя для симметричного режима при всех функционирующих фазах. Затем производится расчёт момента для случая обрыва фазы или фаз. При этом используются вышеприведённые выражения с учётом того, что момент от поля обратной последовательности вычитается из момента, создаваемого полноценно функционирующими тройками фаз. Для определения тока фаз номинальной мощности МАД при обрыве фаз необходимо изменять скольжение машины s до достижения номинального момента двигателя, определённого ранее.

В работе были использованы геометрические данные АД серии 5А мощностью 3,0; 4,0; 5,5 и 7,5 кВт, т.к. многофазные машины проектируются на базе серийных двигателей. По результатам моделирования построены графики нестационарных тепловых процессов во времени. Для примера, приведён график нестационарного нагрева МАД мощностью 5,5 кВт.

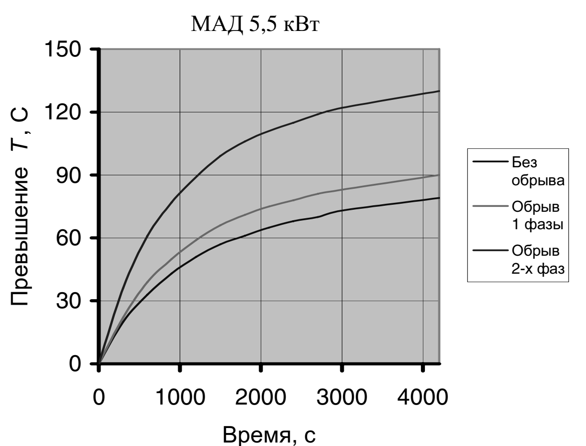


Рисунок. *Графики нестационарного нагрева многофазных АД*

Таблица. *Продолжительность работы двигателей*

Мощность двигателя, кВт	3,0	4,0	5,5	7,5
При обрыве 1 фазы, мин	неогр.	неогр.	неогр.	50
При обрыве 2 фаз, мин	19	15	24	9

На этих графиках представлены данные для девятифазных АД. Но теоретические методы могут быть применены в отношении МАД с любым числом фаз, кратным трём. Для большей наглядности графики сгруппированы для каждого двигателя для номинального режима, а также при обрыве одной или двух фаз. Если принять для класса изоляции F предельную температуру в 95 °C с учётом некоторого запаса на температуру лобовых частей, то по графикам видно, что обрыв фазы не приводит к снижению продолжительности работы двигателя, кроме машины мощностью 7,5 кВт, у которой время работы ограничено 50-тью мин. Что же касается обрыва двух фаз, то в этом случае продолжительность безопасной в тепловом отношении работы

уже существенно ограничена. Более наглядно результаты моделирования представлены в таблице.

Эксперимент

Экспериментальная установка представляет собой шестифазный асинхронный двигатель (U1-V1-W1, U2-V2-W2) мощностью 1,1 кВт при напряжении $U_{2н}$=127 В, соединённый соосно с трёхфазным двигателем в качестве нагрузки. При проведении эксперимента решено было произвести измерение температуры меди обмотки статора машины при всевозможных режимах работы.

Цель испытаний на нагревание – проверка соответствия температуры различных частей машины требованиям стандартов или технических условий, а при исследованиях – определение зависимости температуры машины от изменения нагрузки или других параметров, влияющих на тепловое состояние машины и сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчётами. Поэтому испытаниям на нагревание подвергают все виды электрических машин. ГОСТ Р 51689-00 определяет предельно длительно допускаемые превышения температуры частей электрических машин при различных способах измерения температуры.

Метод сопротивления широко используется для определения среднего превышения температуры изолированных обмоток электрических машин; основан на изменении сопротивления обмотки от её температуры. Для получения теоретических результатов применялась методика, приведённая выше.

Для определения превышения температуры обмотки над температурой охлаждающей среды измеряют сопротивление обмотки при постоянном токе в практически холодном и в нагретом состояниях.

Превышение температуры обмотки над температурой охлаждающей среды можно определить по формуле [5]:

$$\Delta\vartheta = (r_н - r_x)(235 + \vartheta_x)/r_x + \vartheta_x - \vartheta_0, \quad °C.$$

где $\vartheta_н$ и ϑ_x – температура и сопротивление обмоток в нагретом и в практически холодном состоянии; ϑ_0 – температура охлаждающей среды; ϑ – температура, при которой определяется температурный коэффициент сопротивления материала α.

Как наиболее просто реализуемый, был выбран метод сопротивления для определения средней температуры обмотки статора, чтобы сравнить полученный результата с моделированием теплового состояния машины в среде ELCUT. За холодное состояние принято сопротивление при температуре 23 °С.

Так как исследовалась работа машины с обрывом фазы, то было получено представление об изменении теплового состояния двигателя в данном режиме работы. При исследовании производили отключение фазы U1.

Расхождение данных экспериментального исследования и моделирования среде ELCUT 4.2Т находится в пределах 9...11 %.

Выводы

1. Предложена математическая модель тепловых процессов в многофазном асинхронном двигателе, которая позволяет рассчитать превышение температуры обмотки при аварийных режимах.
2. Обрыв одной фазы многофазного асинхронного двигателя не всегда приводит к отказу двигателя в тепловом отношении, и проведённые исследования позволяют определить продолжительность его эксплуатации в аварийной ситуации.
3. Тепловое моделирование и экспериментальное исследование шестифазного асинхронного двигателя в различных режимах показывает высокую адекватность разработанной математической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глухов Д.М. Снижение энергопотребления при использовании асинхронного электропривода // Сибирский Авиа Космический Салон (САКС-2002): Матер. Всеросс. научн.-практ. конф. – Красноярск, СибГАУ, 2002. – С. 187–188.
2. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом / Под ред. Е.М. Плохова. – М.: Транспорт, 2001. – 210 с.
3. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: теория, расчёт, элементы проектирования. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
4. Кирьянов Д.В. Самоучитель MathCAD 2001. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 554 с.
5. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2000. – 255 с.